

应力路径对重塑粘土本构关系影响的试验研究*

周葆春^{1,2}, 王靖涛¹, 卫军¹

(1. 华中科技大学 土木工程与力学学院, 湖北武汉 430074; 2. 信阳师范学院 建筑工程系, 河南信阳 464000)

摘要:为探讨应力路径对重塑粘土本构关系的影响,进行了增、等、减排水和常规三轴压缩不排水应力路径下的三轴压缩试验,获得了四种应力路径下重塑粘土的应力应变关系,采用数值建模方法通过可视化分别给出了四种应力路径下整个应力场中的剪切和体积三维变形曲面,并给出了四种应力路径下的剪切和体积屈服轨迹。对比这四种应力路径下的变形结果发现,无论在应力范围、应变峰值、应变曲面的形状和体积屈服轨迹的变化趋势上都存在显著差别,然而剪切屈服轨迹相似。这些结果证实了应力路径对粘土本构关系的影响是相当大的和不容忽视的,而有效平均正应力对应力路径相关性的影响是决定性的。

关键词:重塑粘土; 本构关系; 应力路径; 数值建模

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7329(2006)06-0058-04

Experimental Study on Influence of Stress Path on the Constitutive Relations for Reshaped Clay

ZHOU Bao-chun^{1,2}, WANG Jing-tao¹, WEI Jun¹

(1. School of Civil Engineering & Mechanics, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, P. R. China; 2. Department of Architectural Engineering, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, P. R. China)

Abstract: In order to study the influence of stress path on the constitutive relations for reshaped clay, the triaxial compression tests under stress paths with drainage in cases of increased, constant and decreased mean normal stress and undrained conventional triaxial compression test have been carried out, the stress-strain relations under the four stress paths are obtained. Through visualization the three-dimensional surfaces of shear and volume strain in the whole stress field under the four stress paths are given respectively by numerical modeling. In addition, the four families of shear and volume yield loci are plotted respectively. It is found through comparing the deformation results under the four stress paths that there are obvious differences in the stress ranges, the strain peaks, the shapes of strain surfaces and the trends of variation of volume yield loci, however, for the four families the shear yield loci are similar. These results demonstrate that the influence of stress path on the constitutive relations of clay is considerably large and could not be neglected, and it relates to the effective mean normal stress closely.

Keywords: reshaped clay; constitutive relations; stress path; numerical modeling

早期的土体工程主要是地基基础问题,随着范围的扩展和规模的增大,土体工程从应力路径来看,可以大致分为两大类;一类是在加载过程中,平均正应力是逐渐增加的;另一类则相反,是减小的。后者大部分是伴随着土体的开挖过程,如地下工程、边坡工程、深基坑工程等。众多研究^[1~4]表明本构关系对应力路径的依赖性存在的,但应力路径相关性的考虑不仅使本构模型本身大大复杂化,也给计算模拟带来困难,从而

限制了它的实际应用价值^[5]。为探讨应力路径对重塑粘土本构关系的影响,进行了增、等、减排水和常规三轴压缩不排水四种应力路径下的三轴压缩试验,对这四种应力路径下重塑粘土的应力应变关系曲线、剪切和体积屈服轨迹以及剪切和体积三维变形曲面进行了对比研究,并采用数值建模方法^[6]描述不同应力路径下土的变形特征,为在土本构理论中考虑应力路径相关性影响提供了一个新的思路。

* 收稿日期:2006-08-12

基金项目:河南省自然科学基金资助项目(0511045200),信阳师范学院青年科研基金资助项目(20050107)

作者简介:周葆春(1978-),男,河南信阳人,博士生,讲师,主要从事土本构关系研究。

1 试验工作

粘土试样取自武汉市某基坑工程。试样的制备和饱和严格按照《土工试验规程》^[7]的要求进行。经界限含水率、土粒比重等试验,试样的各项物性指标见表1所示。

表1 试样的物性指标

17 mm 液限/%	10 mm 液限/%	塑限 /%	塑性 指数	含水率 /%	干密度 /g·cm ⁻³	土粒 比重
48.19	42.67	29.52	18.67	33.4	1.44	2.73

三轴压缩试验分4组进行,每组4个试样。装样完成后,对试样进行反压力饱和。试样完全饱和后,每组分别在100、200、300、400 kPa的周围压力下等压固结,固结的完成以孔隙水压力消散95%以上和排水量稳定为标准。固结完成后,启动试验机电机对试样进行剪切。剪切过程中的应力路径见表2,因在三轴压缩试验中 $p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$,广义剪应力 $q = (\sigma_1 - \sigma_3)$,Lode角均为-30°,在 p 、 q 坐标系中的四种有效应力路径见图1。

表2 三轴压缩试验应力路径

应力路径	增 p 排水 应力路径	等 p 排水 应力路径	常规三轴不排 水应力路径	减 p 排水 应力路径
本文简称	排水常规三 轴压缩试验 (DCTC)	排水等 p 三 轴压缩试验 (DPTC)	不排水常规 三轴压缩试验 (UCTC)	排水减 p 三 轴压缩试验 (DRTC)
排水条件	双面排水	双面排水	不排水	双面排水
剪切	0.014	0.014	0.068 75	0.014
应变速率	/·min ⁻¹	/·min ⁻¹	/·min ⁻¹	/·min ⁻¹
剪切过程	σ_1 增加; σ_3 不变;有效应 力 p 增加	σ_1 增加; σ_3 减小;有效应 力 p 不变	σ_1 增加; σ_3 不变;有效应 力 p 先增加, 后减小	σ_1 不变; σ_3 减小;有效应 力 p 减小
剪切过程 测读数据	测力计、轴向 位移计、排水 管读数	测力计、轴向 位移计、排水 管读数	测力计、轴向 位移计、孔隙 压力读数	测力计、轴向 位移计、排水 管读数
剪切 完成标准	轴向应变达 20%	轴向应变达 20%	轴向应变达 20%	轴向应变达 20%
试样 剪切历时	24 h	24 h	5 h	24 h

为获得弹性体积压缩模量 K ,进行各向等压固结排水试验,增加 σ_3 分别至200、300、400 kPa时固结,待固结完成后分别卸载至50 kPa,待试样自由膨胀稳定后,分别再压缩,最后至600 kPa。为获得弹性剪切模量 G ,分别进行固结压力 $\sigma_3 = 50、200、400$ kPa的带有加卸载循环的常规三轴压缩排水试验。

2 应力应变关系曲线分析

四种应力路径下试样的 $\sigma_1 - \sigma_3 \sim \varepsilon_1$ 和 $\varepsilon_v \sim \varepsilon_1$ 关系分别在图2与3中给出。可见在四种应力路径下重塑粘土试样均呈应变强化特性;在初始阶段,主应力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ 随轴向应变 ε_1 的增长速度由应力路径DCTC

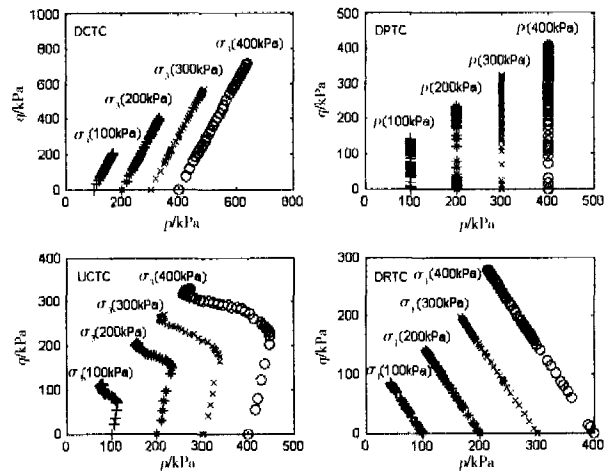


图1 有效应力路径

→DPTC→UCTC→DRTC逐渐增大,而在试样屈服后, $\sigma_1 - \sigma_3$ 随 ε_1 的增长速度由应力路径DCTC→DPTC→UCTC→DRTC逐渐趋缓。鉴于应变强化的试样,一般取 $\varepsilon_1 = 15\%$ 对应的 $\sigma_1 - \sigma_3$ 作为其强度值^[7],从图中还可以看出:增 p 排水应力路径下试样的强度值最大,等 p 排水应力路径下的强度值约为其1/2强,常规三轴不排水应力路径下的强度值约为其1/2弱,减 p 排水应力路径下的强度值约为其1/3强,即试样的强度由应力路径DCTC→DPTC→UCTC→DRTC呈递减趋势。

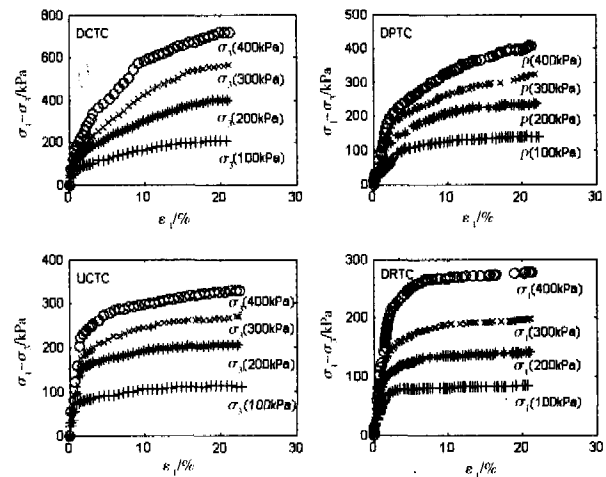


图2 $\sigma_1 - \sigma_3 \sim \varepsilon_1$ 关系

对体应变而言,在增 p (DCTC)和等 p (DPTC)应力路径下均呈纯粹剪缩特性,且随固结压力的增大而递增;且增 p 路径下体应变的增幅为相应等 p 应力路径下的2倍左右。然而体应变在减 p (DRTC)应力路径下呈纯粹剪胀特性,且随固结压力的增大而减小,即固结压力大的试样膨胀小。

3 屈服面分析

采用双屈服面理论,建立屈服面的方法^[8]是:由

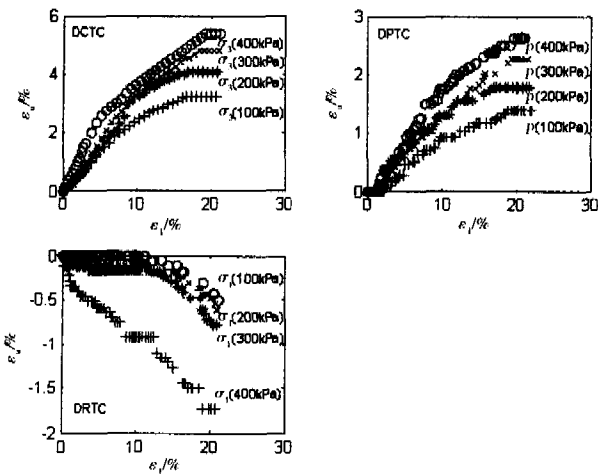


图3 $\epsilon_v - \epsilon_1$ 关系

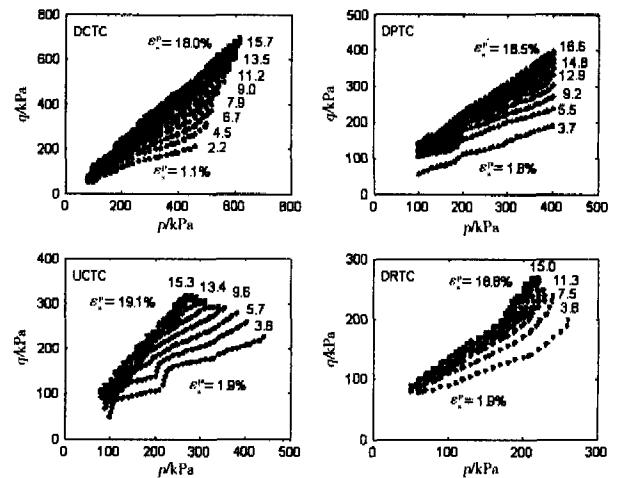


图4 剪切屈服轨迹

带有加卸载循环的三轴压缩试验测出总应变和弹性应变,将二者相减,即可将塑性应变从总应变中分离出来。然后,分别以塑性剪应变 ϵ_s^p 与塑性体应变 ϵ_v^p 为硬化参数,在 $p - q$ 平面上绘制其等值线,即可得到剪切与体积屈服轨迹。据此绘出四种应力路径下的剪切屈服轨迹(图4)与体积屈服轨迹(图5),可见:四种应力路径下试样的剪切屈服轨迹的基本变化趋势比较一致,但由应力路径 DCTC→DPTC→UCTC→DRTC,塑性剪应变的上升速度逐渐增大。对于体积屈服轨迹,增 p 排水(DCTC)应力路径下开始稍微向右偏转,然后较缓慢地向左偏转;在等 p 排水(DPTC)应力路径下单调地向左偏转;在常规三轴不排水(UCTC)应力路径下开始时稍微向右偏转,然后较快地向左偏转,这表明其体积屈服轨迹与有效应力路径轨迹相差不大,这是因为沿不排水有效应力路径,试样总体积不变,弹性体应变的增加等于塑性体应变的减少,而此变化量是微小的,所以该体积屈服轨迹很大程度上取决于试样固结完成后的塑性体应变;在减 p 排水(DRTC)应力路径下开始时单调地向左偏转,临近破坏时,发生剪胀,改向右方偏转。

4 数值建模

在岩土本构模型的数值建模方法^[6]中,土的应力应变关系用下列两个本构泛函表达:

$$\epsilon_v^p = F_1(p, q, p(q)) \quad (1)$$

$$\epsilon_s^p = F_2(p, q, p(q)) \quad (2)$$

式中: $p(q)$ 为应力路径函数; F_1 、 F_2 为两个本构泛函,反映体应变与剪应变之间的相互作用,特别反映应力路径对本构关系的影响。在土的力学试验过程中,当选定一条与工程实际相一致的应力路径时,式(1)和(2)中的 $p(q)$ 即为给定,那么,在给定应力路径下的土本构关系简化为:

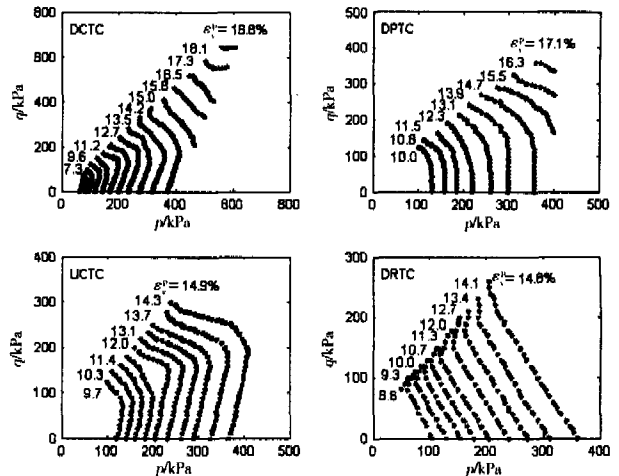


图5 体积屈服轨迹

$$\epsilon_v^p = f_1(p, q) \quad (3)$$

$$\epsilon_s^p = f_2(p, q) \quad (4)$$

实际上,在岩土数值建模中,土的本构关系是从不同应力路径下的三轴试验数据中提炼出来的。从而应力路径的影响即隐含在式(3)和(4)中。将式(3)和(4)写成增量形式为:

$$d\epsilon_v^p = (\partial f_1 / \partial p) dp + (\partial f_1 / \partial q) dq \quad (5)$$

$$d\epsilon_s^p = (\partial f_2 / \partial p) dp + (\partial f_2 / \partial q) dq \quad (6)$$

为了确定方程(5)和(6)中的系数函数,采用高斯函数拟合方法从三轴试验数据中获取整个应力场的应力应变关系以及4个偏导数。它们均采用高斯函数级数形式的表达,见式(7):

$$f(p, q) = \sum_{k=1}^N \omega(k) \exp(-\alpha((p - p_k)^2 + (q - q_k)^2)) \quad (7)$$

式中: $\exp(-\alpha((p - p_k)^2 + (q - q_k)^2))$ 为高斯函数, $\omega(k)$ 为第 k 个高斯中心点上的权重, α 为调节参数, p_k 、 q_k 为 (p, q) 应力场中高斯中心点的坐标, N 为高斯中心点总数。

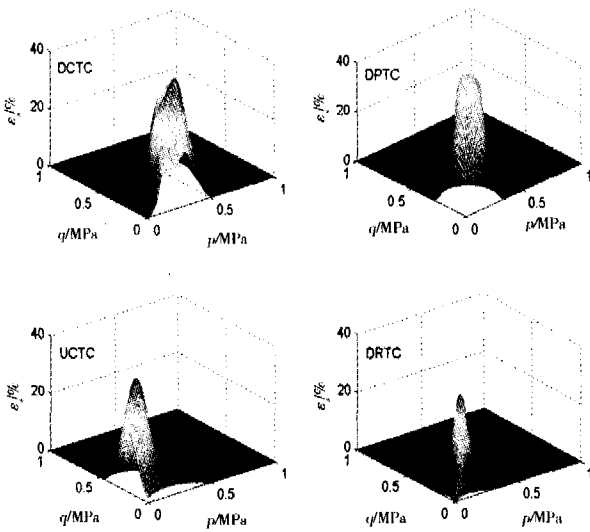


图6 $\epsilon_s \sim (p, q)$ 关系

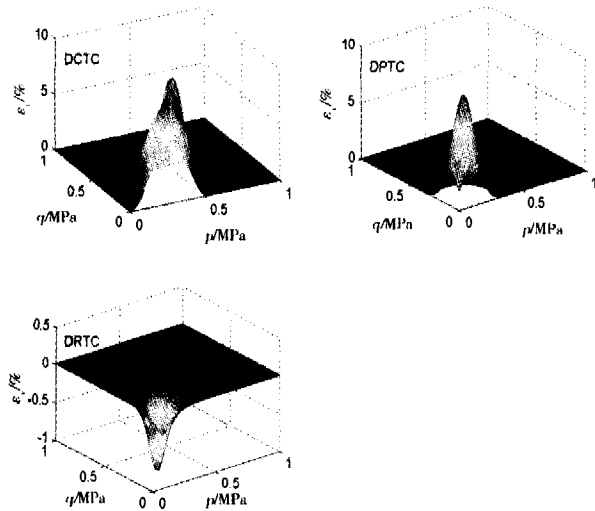


图7 $\epsilon_v \sim (p, q)$ 关系

采用上述方法,对粘土的三轴压缩试验数据组 $(p, q, \epsilon_v, \epsilon_s)$ 进行高斯拟合获得了整个应力场 (p, q) 中的应力应变关系, $\epsilon_s \sim (p, q)$ 与 $\epsilon_v \sim (p, q)$ 关系曲面分别见图6与7。由图可见,四种应力路径下试样的 $\epsilon_s \sim (p, q)$ 曲面在上升坡度方面,由应力路径 DCTC \rightarrow DPTC \rightarrow UCTC \rightarrow DRTC, 渐趋陡峭,这与剪切屈服轨迹的变化情况相吻合。对于 $\epsilon_v \sim (p, q)$ 曲面,增 p 排水(DCTC)应力路径下的峰值比等 p 排水(DPTC)应力路径下的高;而减 p 排水(DRTC)应力路径下的体应

变完全为负值,这意味着整个变形过程均是体积膨胀。由此可见,数值建模方法能够比较全面地描述不同应力路径下土的变形特征。

5 结论

1) 为探讨应力路径对重塑粘土本构关系的影响,进行了增 p 、等 p 、减 p 排水和常规三轴不排水应力路径下的三轴压缩试验,获得了四种应力路径下重塑粘土的应力应变关系。

2) 采用数值建模方法通过可视化分别给出了四种应力路径下在整个应力场中剪切和体积的三维变形曲面,并给出了四种应力路径下的剪切和体积屈服轨迹。对比这四种应力路径下的变形结果发现,无论在应力范围、应变峰值、应变曲面的形状和体积屈服轨迹的变化趋势上都存在显著差别,而剪切屈服轨迹相似,这些结果都证实了应力路径对粘土本构关系的影响是相当大的和不容忽视的。同时也表明数值建模方法能够比较全面地描述不同应力路径下土的变形特征。

3) 试验结果表明有效平均正应力 p 对应力路径相关性的影响是决定性的。

参考文献:

- [1] 刘祖德,陆士强,杨天林,等. 应力路径对填土应力应变关系的影响及其应用[J]. 岩土工程学报,1982,4(4):45-55.
- [2] 刘祖德. 土石坝变形计算的若干问题[J]. 岩土工程学报,1983,5(1):1-13.
- [3] 孙岳崧,濮家骊,李广信. 不同应力路径对砂土应力应变关系的影响[J]. 岩土工程学报,1987,9(6):78-88.
- [4] 刘占芳,杨全虎,姜乃斌. 饱和软土地基弹塑性固结沉降研究[J]. 重庆建筑大学学报,2005,27(2):51-55.
- [5] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2000.
- [6] 王靖涛. 建立岩土本构模型的数值方法[J]. 华中科技大学学报(城市科学版),2002,19(1):44-47.
- [7] SL237-1999,土工试验规程[S].
- [8] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京:中国水利水电出版社,1983.